

Development of a Coupled Hydrologic-Land Surface Model to Improve River Flow Simulation in the Karkheh Basin

MARYAM SHAFIEI¹, JAVAD BAZRAFSHANI¹, PARVIZ IRANNEJAD²

1. Department of Irrigation and Reclamation, Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

ABSTRACT

In this study, with the aim of improving river flow simulation, the effect of coupling between Atmosphere-Land Surface Interaction Scheme (ALISIS) and HBV hydrological model in Karkheh Basin and its sub basins without considering South Karkheh basin was investigated. Before coupling, comparison between soil moisture of HBV model and ALISIS scheme was performed and the accuracy of soil moisture results of both models was evaluated with observational data. Some metrics such as NSE, RMSE, BIAS and RSR were used to compare the simulated and observed data. Comparison of simulated soil moisture results by ALISIS and HBV with observational data showed that in all sub-basins there was better agreement between ALISIS soil moisture and observational data (compared to HBV). The ALISIS scheme showed better simulation in wet seasons and high humidity and HBV model in dry seasons and low humidity. The ALISIS-HBV coupled model performed better than HBV in all sub-basins and the entire Karkheh Basin, especially at high flow. The best results were obtained for the Ghare Sou subbasin with $NSE=0.76 - 0.88$, $RMSE=7.7 - 4.5$ mm per month, and $RSR=0.49 - 0.34$. The greatest reduction in BIAS error occurred in the Kashkan subbasin, which decreased from 0.24 to 0.03.

Keywords: ALISIS Scheme, HBV model, River flow, Karkheh Basin

توسعه یک مدل جفت شده سطح زمین-آب‌شناسی به منظور بهبود شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه کرخه

مریم شفیعی^۱، جواد بذرافشان^{۱*}، پرویز ایران نژاد^۲

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران

۲. گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۵/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۶/۱۲)

چکیده

در این مطالعه با هدف بهبود شبیه‌سازی جریان رودخانه، تاثیر جفت‌سازی طرحواره برهمکنش جو-سطح خشکی ALSIS با مدل آب‌شناسی HBV در کل حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آنبدون در نظر گرفتن حوضه کرخه جنوبی بررسی شد. قبل از جفت‌سازی، مقایسه بین رطوبت خاک مدل HBV و طرحواره ALSIS صورت گرفت و صحت نتایج رطوبت خاک هر دو مدل با داده‌های مشاهداتی بررسی شد. برای مقایسه نتایج مدل و داده‌های مشاهده‌ای از سنج‌های آماری RMSE، NSE، BIAS و RSR استفاده شد. مقایسه نتایج رطوبت خاک شبیه‌سازی شده به وسیله ALSIS و HBV با داده‌های مشاهداتی نشان داد در همه زیرحوضه‌ها همخوانی بهتری بین رطوبت خاک ALSIS و داده‌های مشاهده‌ای (در مقایسه با HBV) وجود دارد. طرحواره ALSIS در فصول مرطوب و مقادیر زیاد رطوبت و مدل HBV در فصول خشک و مقادیر کم رطوبت شبیه‌سازی بهتر نشان داده‌اند. مدل جفت‌شده ALSIS-HBV در همه زیرحوضه‌های کرخه و کل حوضه عملکرد بهتری نسبت به HBV، به‌ویژه در جریان‌های بیشینه، داشته است. بهترین نتایج شبیه‌سازی جریان در زیرحوضه قره‌سو مقادیر NSE ۰/۷۶ تا ۰/۸۸، RMSE ۷/۷ تا ۴/۵ میلی‌متر در ماه و RSR ۰/۴۹ تا ۰/۳۴ به دست آمد. بیشترین مقدار کاهش خطای BIAS مربوط به زیرحوضه کشکان است که از ۰/۲۴ به ۰/۰۳ رسید.

واژه‌های کلیدی: طرحواره ALSIS، مدل HBV، جریان رودخانه، حوضه کرخه

مقدمه

چرخه آب یا چرخه آب‌شناسی هسته مرکزی سامانه مدل‌سازی سطح خشکی است و بحران منابع آب یکی از بحران‌های محیطی و مسائل سیاسی قرن ۲۱ می‌باشد (NRC, 2004). مدل‌های آب‌شناسی ابزار مهمی برای فهم و درک فرآیندهای آب‌شناسی و شبیه‌سازی و پیش‌بینی وقایع آب‌شناسی برای تصمیم‌گیری بهتر هستند. در واقع، مدل‌های آب‌شناسی برای پاسخ به این پرسش طراحی شده‌اند: "چه اتفاقی برای بارندگی رخ داده است؟" (Penman, 1961). به‌طور کلی، مدل‌های آب‌شناسی به سه دسته تجربی، مفهومی و مدل‌های فیزیک‌پایه تقسیم می‌شوند. مدل‌های تجربی، مدل‌های مشاهده‌گرا هستند که تنها اطلاعات را از داده‌های موجود بدون در نظر گرفتن ویژگی‌ها و فرآیندهای سامانه

آب‌شناسی دریافت می‌کنند. مدل‌های مفهومی (مدل‌های پارامتری) همه مولفه‌های چرخه آب‌شناسی را شرح می‌دهند. (Bergstrom, و TOPMODEL (Beven and Kirby, 1979) مدل‌های HBV^۴ (1976) مثال‌هایی از این نوع مدل‌ها است. مدل‌های فیزیک‌پایه^۵ که به آنها مدل‌های مکانیسمی^۶ هم گفته می‌شود، در اصل بر پایه فرآیندهای فیزیکی هستند. مدل MIKE (Abbott et al., 1986) SHE1986) مثالی از این نوع مدل است. هرچند مدل‌های فیزیک‌پایه به‌علت کاربرد پارامترهایی که مفهوم فیزیکی دارند بر خیلی از نقص‌های دو مدل دیگر غلبه می‌کنند، ولی مقایسه مدل‌های آب‌شناسی نشان می‌دهد که مدل‌های بارش-رواناب ابزار استاندارد برای بررسی فرآیندهای آب‌شناسی هستند. به‌طور کلی، هر کدام از مدل‌ها ایراداتی دارند که برای حل

* نویسنده مسئول: jbazr@ut.ac.ir

1- Empirical models
2- Conceptual Models (Parametric Models)
3- TOPography based hydrological MODEL)
4- Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning model
5- Physically Based Models
6- Mechanistic Models

که مدل ظرفیت نفوذ متغیر^۸ (VIC) تلفیق شده با یک مدل روندیابی توانایی بالایی در شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه آبریز سفیدرود دارد. Shen *et al.* (2015) به منظور بررسی خشک‌سالی جریان رودخانه در مقیاس مکانی-زمانی بزرگ، مدل آب‌شناسی VIC را با شاخص SRI اصلاح شده برای سنجش خشک‌سالی در حوضه رودخانه Weihe جفت کردند. یافته‌ها نشان داد مدل جفت شده قابلیت بازتولید توزیع مکانی وقایع خشک‌سالی را دارد و ناهمگنی مکانی خشک‌سالی منطقه‌ای را منعکس می‌کند. Min *et al.* (2014) دقت شبیه‌سازی جریان رودخانه در حوضه رودخانه Huaihe در چین را با دو مدل مختلف، مدل جفت شده آب‌شناسی-سطح زمین CLHMS و مدل آب‌شناسی LSX-HMS بررسی کردند. مقایسه نتایج دو مدل مذکور نشان داد که شبیه‌سازی جریان رودخانه توسط مدل جفت شده کارایی بالایی داشت و ضریب Nash-Sutcliffe مربوط به آن بیشتر از ۰/۷۶ بود، ولی کارایی مدل آب‌شناسی نسبتاً ضعیف بود. یافته‌های آنها اهمیت جفت کردن طرحواره سطح زمین و مدل آب‌شناسی را در دستیابی به پیش‌بینی‌های بهتر برای فرآیندهای آب‌شناسی نشان می‌دهد.

در این پژوهش، با هدف دستیابی به نتایج بهتر در شبیه‌سازی جریان رودخانه، از مدل جفت شده طرحواره برهمکنش جو-سطح خشکی (Irannejad and Shao, 1998)^۹ (ALSIS) با مدل آب‌شناسی HBV (Bergström, 1995) استفاده می‌شود. همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد، مدل HBV به‌طور گسترده‌ای در مطالعات خشک‌سالی آب‌شناسی به کار گرفته شده است (Van Loon, 2013; Veenstra, 2009; Van Loon *et al.*, 2010). این مدل برای چهار حوضه در اقلیم‌های مختلف کره زمین شامل اروپا، آفریقا و آمریکای جنوبی (Lidén and Harlin, 2000) و دو حوضه در اروپا (Rakovec *et al.*, 2009) مورد استفاده قرار گرفته است. یافته‌ها حاکی از نتایج قابل قبول مدل در مناطق مورد مطالعه برای بررسی خشک‌سالی آب‌شناسی است. Te Linde *et al.* (2008) عملکرد مدل مفهومی نیمه‌توزیعی HBV و مدل فیزیک‌پایه توزیعی VIC را در حوضه Rhine واقع در اروپا مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد عملکرد مدل HBV بهتر از مدل VIC بود. نتایج اجرای هر دو مدل در خروجی حوضه نسبت به بالادست حوضه بهتر بود و مدل HBV برای بالادست حوضه نتایج بهتری

این مشکل می‌توان از تکنیک سنجش از دور، تحلیل ریسک، جفت‌سازی بین مدل‌های آب‌شناسی و سطح زمین استفاده کرد (Devia *et al.*, 2015). با توجه به عدم فرمول‌سازی فرآیندهای سطح زمین در مدل‌های آب‌شناسی، برآورد تابش خالص، شار گرمای خاک و مقاومت آئرودینامیکی در این مدل‌ها تجربی است (Shi, 2012). بنابراین، جفت کردن مدل‌های سطح زمین با مدل‌های آب‌شناسی برای بهبود نتایج مدل‌های آب‌شناسی و سطح زمین مفید است.

Bouilloud and Coauthors (2010) مدل برهمکنش جو-زیست‌کره-خاک (ISBA) را با مدل آب‌شناسی مفهومی TOPMODEL برای پیش‌بینی سیلاب‌های برق‌آسا^۲ در منطقه مدیترانه جفت کردند. نتایج ارزیابی پیش‌بینی‌های دبی با مدل جفت شده^۳ در سه حوضه با اندازه‌های متوسط قابل قبول بود. Livneh *et al.* (2011) مدل جفت شده سطح زمین یک بعدی Noah LSM و مدل آب‌شناسی^۴ (SAC-SMA) را در شش حوضه آبریز با اندازه متوسط در ایالات متحده آزمون و بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل جفت شده نشان داد که شبیه‌سازی‌ها در حوضه‌های خشک‌تر به پارامترهای لایه بالایی خاک حساس‌ترند. نتایج کاربست مدل جفت شده آب‌شناسی-سطح زمین CLHM در حوضه رودخانه Huaihe نشان می‌دهد مدل قابلیت بالایی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه و دینامیک آب زیرزمینی دارد (Yang *et al.*, 2015). Tian *et al.* (2012) مدل جفت شده آب زیرزمینی^۵ GWMs و مدل زیست‌کره ساده-شده سطح زمین^۶ (SiB2) را برای بهبود شبیه‌سازی چرخه آب و انرژی در حوضه رودخانه Heihe در چین به کار بردند. در مدل جفت شده، فرآیندهای سطحی و زیرسطحی در یک سامانه شبیه‌سازی می‌شوند و برهمکنش‌های بین حرکت آب زیرزمینی و فرآیندهای آب و انرژی در لایه سطحی خاک به خوبی نشان داده می‌شود. Khodamorad Poor and Irannejad (2009) به منظور ارزیابی دبی شبیه‌سازی شده در سه زیرحوضه رودخانه کارون، طرحواره سطح^۷ OSU را به دو شکل جفت نشده و جفت شده با تاپ مدل ساده شده (SIMTOP) به کار بردند. مدل جفت شده OSU-SIM در دوره اعتبارسنجی در هر سه زیرحوضه ضریب کارایی بزرگ‌تر و اریبی و قدر مطلق میانگین خطاهای کوچک‌تری را نسبت به OSU نشان داد. Parviz *et al.* (2011) نشان دادند

7 - Oregon State University

8 - Variable Infiltration Capacity

9 - Atmosphere-Land-Surface Interaction Scheme

1- Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere

2- Flash-Flood

3- Coupled Model

4- Sacramento Soil Moisture Accounting model

5 - Groundwater Models

6 - Simple Biosphere Model

و رابطه بین آنها دارد. بنابراین بر اساس مطالعات قبلی در زمینه مدل HBV و طرحواره ALSIS، ضعف مدل HBV در ساده سازی دینامیک رطوبت خاک و دقت بالای طرحواره ALSIS در شبیه سازی رطوبت خاک منجر به جفت سازی طرحواره سطح زمین ALSIS با مدل آب شناسی HBV به منظور بهبود شبیه سازی جریان رودخانه در حوضه کرخه می شود. فرضیه پژوهش این است که کاربرد مدل جفت شده آب شناسی - سطح زمین در مقایسه با استفاده تنها از مدل آب شناسی، نتایج شبیه سازی جریان رودخانه را بهبود می بخشد.

مواد و روش

منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی این تحقیق حوضه آبریز کرخه است (شکل ۱). این حوضه از نظر تامین منابع آب در غرب کشور حائز اهمیت است. حوضه کرخه در مناطق میانی و جنوب غربی رشته کوه های زاگرس قرار دارد و شامل ۵ زیرحوضه گاماسیاب، سیمره، قره سو، کشکان و کرخه جنوبی می باشد. مساحت حوضه بالغ بر ۵۰۷۶۸ کیلومتر مربع است و در طول جغرافیایی ۱۰' ۴۹° - ۰۶' ۴۶° شرقی و عرض ۵۶' ۳۴° - ۵۲' ۳۰° شمالی قرار گرفته است. حوضه کرخه از شمال به حوضه های رودخانه های سیروان، سفیدرود و قره -

چای، از غرب به رودخانه های مرز یوغریان (عراق) و از شرق به حوضه رودخانه دز محدود می شود. سرشاخه های اصلی تشکیل دهنده رودخانه کرخه شامل رودخانه های گاماسیاب، قره سو، کشکان و سیمره می باشند. ایستگاه آب سنجی پایپلدر پایین دسترودخانه کرخه دبیخرو و جیحوضه را اندازه گیری می کند. ویژگی های حوضه کرخه و زیرحوضه های آن در جدول (۱) آورده شده است.

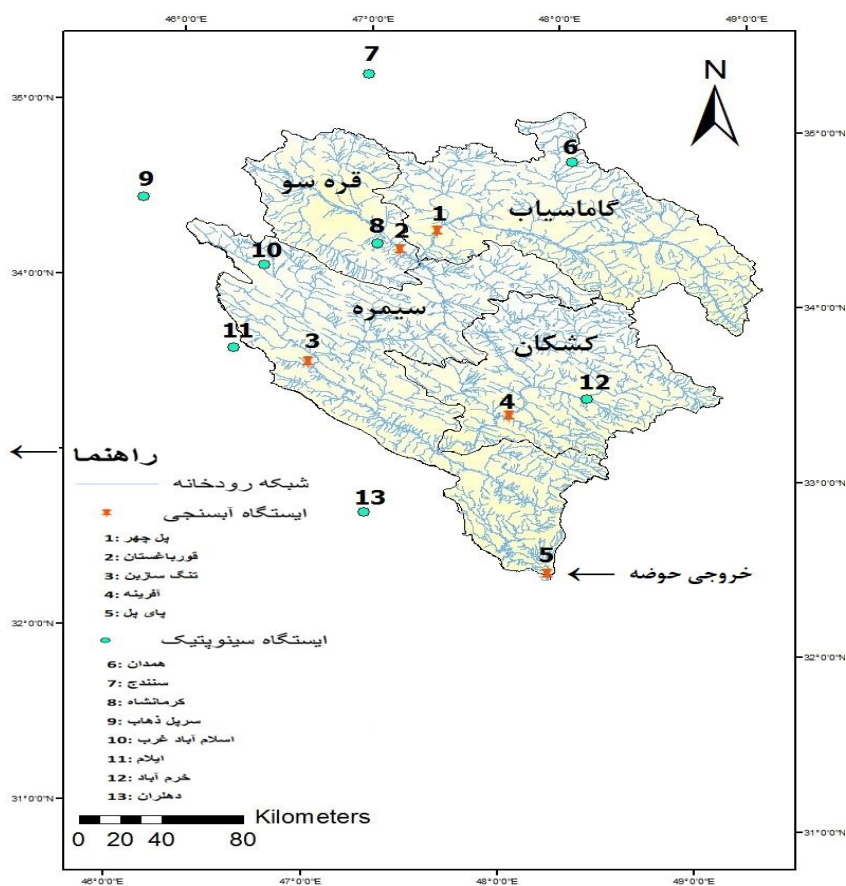
در این مطالعه، برای محاسبه بارش و دما در حوضه کرخه از میانگین مکانی به روش تیسن (Thiessen) استفاده شده است. برای محاسبه بارش و دما در حوضه کرخه از میانگین داده ها در ایستگاه های همدان، سنندج، کرمانشاه و خرم آباد استفاده شده است. داده های رطوبت خاک برای زیرحوضه های گاماسیاب، قره سو، کشکان و سیمره به ترتیب از ایستگاه های اکباتان، سرارود، سیلاخور و سرابله در بازه زمانی نوامبر ۲۰۱۰ تا جولای ۲۰۱۴ و در عمق ۳۰ سانتی متری استفاده شده اند. داده های ایستگاه های همدان از سازمان هواشناسی کشور و داده های آب سنجی از وزارت نیرو، شرکت مدیریت منابع آب ایران تهیه شده است.

را نشان داد. همچنین مدل HBV بیشینه دبی را بهتر از VIC شبیه سازی می کند. Hohenrainer (2008) دقت شبیه سازی جریان رودخانه را در دو حوضه در آلمان و نروژ با مدل های آب شناسی ECOMAG^۱ و HBV بررسی کردند. نتایج حاکی از این بود که مدل HBV برای شبیه سازی ویژگی های خشک سالی جریان رودخانه در هر دو حوضه نسبت به مدل ECOMAG توانایی بالاتری دارد. از مهم ترین مزایای مدل HBV این است که همه فرآیندهای آب شناسی حوضه را شبیه سازی می کند و به داده های ورودی کمی نیاز دارد، اما طراحی مدل برای گام زمانی روزانه، ساده سازی دینامیک رطوبت خاک و محدود بودن اطلاعات در دسترس آن از مهم ترین محدودیت های این مدل است (SHMI, 2003; Lindström et al., 1997). هر چند مدل HBV به طور دقیق همه فرآیندهای فیزیکی حوضه را شرح نمی دهد، اما برای شبیه سازی زمان و بزرگی وقایع سیل و خشک سالی اهمیت اساسی دارد (Robinson and Ward, 2000). طرحواره ALSIS کمتر در مطالعات خشک سالی استفاده شده است. مهم ترین مزیت این مدل بهبود رفتار آب شناسی خاک سطحی است و برخلاف سایر مدل های سطح زمین، رطوبت خاک را به خوبی شبیه سازی می کند. (Munro et al., 1998) مدل ALSIS را به منظور پیش بینی توزیع مکانی رطوبت خاک در استرالیا به کار بردند. نتایج ارزیابی مدل در حد مطلوبی رضایت بخش بود. Leung (2006) عملکرد طرحواره ALSIS را برای شبیه سازی شارهای انرژی سطحی، رطوبت خاک و دمای خاک با کاربرد مجموعه داده های GobiQira (۳۶-۹۰ درجه شمالی، ۷۸-۸۰ درجه شرقی) بررسی کرد. مقایسه داده های مشاهداتی با شبیه سازی شده نشان داد مدل برای شار تابش خالص سطح و دمای خاک پیش بینی های بسیار خوبی ارائه داد. این طرحواره در سال ۲۰۰۲ توسط Xu and Shao با مدل MODFLOW به منظور توسعه یک مدل انتقال املاح جفت شد. مدل جدید تاثیر آب آبیاری را بر زمین شور در یک منطقه کشت برنج بررسی کرد. Hejabi (2017) تاثیر حاصل از جایگزین کردن طرحواره ALSIS به جای مدل ترازمندی آب پالم در حوضه کرخه را مورد بررسی قرار داد. مقایسه جریان شبیه سازی شده مشاهده شده در شایستگاه آب-سنجی در سطح حوضه کرخه که توانایی خوب تر حوضه را شبیه سازی می کند، به علاوه، مدل توانایی خوب تر در شبیه سازی جریان ماهانه رودخانه است. به علاوه، مدل توانایی خوب تر در شبیه سازی جریان ماهانه رودخانه است. به علاوه، مدل توانایی خوب تر در شبیه سازی جریان ماهانه رودخانه است. به علاوه، مدل توانایی خوب تر در شبیه سازی جریان ماهانه رودخانه است.

های ترازمندی آب، توزیع مکانی میانگین بلندمدت مؤلفه ها

جدول ۱- مشخصات حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن

نام زیرحوضه / حوضه	ایستگاه آب‌سنجی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	مساحت (کیلومتر مربع)	دوره مطالعاتی
زیرحوضه گاماسیاب	پل چهر	۴۷۵۲۶	۳۴۵۲۱	۱۰۸۶۰	۱۹۵۶-۱۹۸۰
زیرحوضه قره‌سو	قورباغستان	۴۷۵۱۵	۳۴۵۱۴	۵۳۷۰	۱۹۵۸-۱۹۸۲
زیرحوضه کشکان	آفرینه	۴۷۵۵۴	۳۳۵۲۰	۹۱۴۰	۱۹۵۷-۱۹۸۱
زیرحوضه سیمره	تنگ سازین	۴۶۵۵۱	۳۳۵۳۴	۱۵۷۳۵	۱۹۸۷-۱۹۹۶
حوضه کرخه	پای پل	۴۸۵۰۵	۳۲۵۱۵	۴۲۲۳۹	۱۹۶۲-۱۹۸۰



شکل ۱- حوضه آبریز کرخه و زیرحوضه‌های آن

مدل جفت‌شده ALSIS-HBV

در این مطالعه برای شبیه‌سازی جریان رودخانه از یک مدل جفت‌شده سطح زمین-آب‌شناسی استفاده می‌شود. در مدل آب-شناسی HBV بخش مربوط به رطوبت خاک خیلی ساده‌سازی شده است. در مقابل، نقطه قوت طرحواره ALSIS دقت بالا در پیش‌بینی رطوبت خاک است. بنابراین، بخش اصلی در جفت‌سازی دو مدل بخش رطوبت خاک است.

در هر گام زمانی رطوبت خاک مدل HBV توسط طرحواره ALSIS به‌روزرسانی می‌شود. سپس مدل HBV با محاسبه توزیع جانبی رطوبت و نفوذ عمقی بر روی حوضه، میزان رطوبت در

مخازن بالایی و پایینی و جریان‌های سطحی، جانبی و پایه و در نهایت جریان خروجی حوضه را شبیه‌سازی می‌کند.

فرایند جفت‌سازی مدل‌ها به‌صورت یک‌طرفه صورت می‌گیرد. رطوبت خاک ALSIS به‌عنوان یک ورودی جدید برای مدل HBV تعریف می‌شود. سپس، با اعمال تغییراتی در کد HBV، به‌جای محاسبات مربوط به رطوبت در روال خاک، رطوبت خاک ALSIS را به‌صورت روزانه برای محاسبات بعدی استفاده می‌کند. بنابراین، در این جفت‌سازی، پارامترهای مدل HBV به‌طور مستقیم دخالت دارند و نتایج تحلیل حساسیت و واسنجی مدل HBV به‌کار می‌رود. مدل HBV توسط Shafiei et al. (2019)

و نصف‌النهاری (v) سرعت باد و بر اساس رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (\text{رابطه ۱})$$

رطوبت ویژه با استفاده از رابطه August-Roche-Magnus

محاسبه می‌شود (Alduchov and Eskridge, 1996):

(رابطه ۲)

$$q = 6.22 \times 10^{-3} \frac{RH \times e_s}{P} = 0.038 \frac{RH}{P} \exp\left(\frac{17.67T}{T + 243.5}\right)$$

که T دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$)، RH رطوبت نسبی (%)، P فشار هوا (mb)، e_s فشار بخار اشباع در دمای T (mb) و q رطوبت ویژه (kg kg^{-1}) است.

برای تعیین درصد پوشش زمین از محصول جهانی طبقه-بندی پوشش سطح خشکی (AVHRR) (Hansen et al., 1981) با تفکیک مکانی 0.8 درجه استفاده شد. پارامترهای ارتفاع گیاه، درصد پوشش زمین توسط گیاه، آلبیدو و حداقل مقاومت روزنه‌ای از پایگاه داده سامانه جهانی گوارد داده‌های خشکی (GLDAS) (Rodell et al., 2004) تعیین شد. در مورد شاخص سطح برگ (LAI) از داده‌های جهانی تهیه شده توسط گروه پژوهش اقلیم و پوشش گیاهی (Zhuet al., 2013) استفاده شد. برای تهیه نقشه بافت خاک از پایگاه داده جهانی هماهنگ خاک ($HWSD$) استفاده شد (Wieder et al., 2014). در طرحواره ALSIS مقدار آغازگری رطوبت برابر ظرفیت زراعی و مقدار آغازگری دمای خاک برابر دمای هوا در نظر گرفته می‌شود.

ب- مدل آب‌شناسی HBV

در این مطالعه، برای شبیه‌سازی جریان رودخانه از مدل آب-شناسی HBV استفاده می‌شود. مدل HBV (Bergstrom, 1995) یک مدل مفهومی بارش-رواناب است، نسخه اصلی مدلبرای شرایط اقلیمی اسکاندیناوی توسعه یافت، اما به‌طور گسترده برای پیش‌بینی جریان رودخانه در حوضه‌های مختلف جهان به‌کار گرفته شده است (Van Pelt et al., 2009; Driessen et al., 2008; Akhtar et al., 2010). مدل HBV شامل چهار روال برف، رطوبت خاک، پاسخ (آب زیرزمینی) و روندیابی است. مدل HBV به زبان برنامه‌نویسی ++C نوشته شده و در گام زمانی روزانه اجرا می‌شود. متغیرهای جوی مورد نیاز برای اجرای مدل HBV شامل دمای هوا ($^{\circ}\text{C}$) و بارش (mm) است. مدل HBV دوازده پارامتر دارد که شامل پارامترهای روال برف، خاک، پاسخ و روندیابی می‌باشند. توضیحات مربوط به این پارامترها در جدول (۲) آمده است.

تحلیل حساسیت و واسنجی شده است و در این مطالعه از نتایج ایشان استفاده شده است. قبل از جفت‌سازی، رطوبت خاک شبیه‌سازی شده طرحواره ALSIS و مدل HBV با داده‌های مشاهداتی مقایسه و اعتبارسنجی می‌شوند. در ادامه طرحواره سطح زمین ALSIS و مدل آب‌شناسی HBV به اختصار شرح داده می‌شود:

الف- طرحواره پارامترسازی سطح خشکی (ALSIS)

در این مطالعه، از طرحواره برهمکنش جو-سطح خشکی (ALSIS) (Irannejad and Shao, 1998) برای برآورد رطوبت خاک استفاده می‌شود. این طرحواره یک طرحواره پارامترسازی سطح خشکی است که می‌تواند به صورت تک‌ایستا و یا جفت‌شده با مدل جوی برای محاسبه شارهای انرژی، جرم و تکانه به‌کار رود. نسخه تک‌ایستای طرحواره ALSIS در محیط FORTRAN 77 نوشته شده و دارای یک ساختار ماژولی و تعدادی زیربرنامه برای نمایش پارامترسازی‌های گوناگون فرایندهای سطح خشکی است. طرحواره مذکور یک مدل سطح زمین با تاکید بر پیش‌بینی رطوبت خاک است. ویژگی مهم این مدل، بهبود رفتار آب‌شناسی خاک سطحی است (Irannejad and Shao, 1998). متغیرهای جوی مورد نیاز برای اجرای طرحواره ALSIS شامل دمای هوا (K)، رطوبت ویژه هوا (kg kg^{-1})، تابش موج کوتاه و موج بلند رو به پایین (W m^{-2})، سرعت باد (m s^{-1})، شدت بارش (mm s^{-1}) و فشار هوا (Pa) است. برای اجرای طرحواره ALSIS از داده‌های ایستگاه همدید استفاده می‌شود. داده‌های دمای هوا، سرعت باد، فشار هوا و رطوبت نسبی هر سه ساعت یک بار و داده‌های بارش هر شش ساعت یکبار برداشت می‌شود. از آنجایی که گام زمانی اجرای طرحواره ALSIS نیم‌ساعتی است، ضروری است که داده‌ها درون‌یابی شوند. درون‌یابی زمانی داده‌ها از تفکیک ۳ ساعتی به ۳۰ دقیقه‌ای و با روش خطی انجام شد. داده‌های بارش شبه صورت تجمعی است و مجموع بارندگی شش ساعت را نشان می‌دهد. شدت بارش با فرض بارش یکنواخت طیف و اصل شش ساعتی برای گام زمانی ۳۰ دقیقه محاسبه می‌شود. در ایستگاه‌های همدید، داده‌های تابش به‌صورت مقادیر روزانه تابش کل گزارش می‌شود که برای طرحواره ALSIS کارایی ندارد. بنابراین، داده‌های تابش از پایگاه داده‌های باز تحلیل سامانه پیش-بینی اقلیم (CFSR) (Saha et al., 2010) تهیه شد و سپس درون‌یابی داده‌ها به نیم‌ساعتی انجام شد.

مقادیر متغیر سرعت باد با استفاده از مؤلفه‌های مداری (u)

جدول ۲- پارامترهای مدل HBV بر اساس مطالعات قبلی (Herman et al., 2013)

ردیف	پارامتر	واحد	توضیح	محدوده بالا	محدوده پایین
۱	K2	روز/۱	نرخ رکود از لایه عمیق خاک	۰/۱	۰/۰۰۰۰۵
۲	K1	روز/۱	نرخ رکود لایه میانی خاک	۱	۰/۰۱
۳	K0	روز/۱	نرخ رکود لایه سطحی خاک	۲	۰/۰۵
۴	MaxBas	ساعت	طول انتقال آب نمود روندیابی	۱۲۰	۲۴
۵	degd	میلی متر بر (روز در درجه سلسیوس)	فاکتور درجه روز (نرخ ذوب برف)	۲۰	۰
۶	degw	درجه سلسیوس	دمای پایه که بالاتر از آن ذوب برف رخ می دهد	۳	-۳
۷	tlim	درجه سلسیوس	دمای آستانه که در کمتر از آن یخ زدگی رخ می دهد	۳	-۳
۸	perc	میلی متر بر روز	نرخ نفوذ در لایه عمیق خاک	۱۰۰	۰
۹	B	-	ضریب توزیع ذخیره رطوبت خاک	۷	۰
۱۰	lp	-	محدودیت رطوبت خاک در تبخیر - تعرق پتانسیل	۱	۰/۳
۱۱	Fcap	میلی متر	بیشینه ذخیره رطوبت خاک	۲۰۰۰	۱۰
۱۲	h11	میلی متر	بیشینه ذخیره لایه سطحی خاک	۱۰۰	۰

$$RMSE = \sqrt{[(\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2) / N]} \quad (\text{رابطه ۵})$$

RSR می تواند از صفر تا یک مقدار مثبت بزرگ تغییر کند.

هر چه این آماره کوچک تر باشد نتایج بهتر مدل را نشان می دهد.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

نتایج و بحث

مقایسه رطوبت خاک ALSIS و HBV

جدول (۳) آمار پایه بارش و رطوبت خاک ALSIS، HBV و داده های مشاهداتی در زیرحوضه های کرخه طی سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ را نشان می دهد. در همه زیرحوضه ها همخوانی بهتری بین رطوبت خاک ALSIS و داده های مشاهداتی وجود دارد. میانگین و انحراف معیار رطوبت خاک ALSIS و داده های مشاهداتی تقریباً مشابه هستند که در زیرحوضه گاماسیاب میانگین رطوبت خاک (۰/۲۱ میلی متر در روز) و در زیرحوضه سیمره انحراف معیار (۰/۰۴ میلی متر در روز) برای ALSIS و داده های مشاهداتی برابر است. مقایسه ضریب تغییرات رطوبت خاک مشاهداتی با مدل ها نشان می دهد که در هر چهار زیرحوضه ضریب تغییرات رطوبت خاک ALSIS به داده های مشاهداتی نزدیک تر است که نتایج آن در زیرحوضه سیمره بهتر از سایر زیرحوضه هاست. مقدار این ضریب در زیرحوضه سیمره ۱۸/۷ درصد و مقدار آن برای داده های مشاهداتی این زیرحوضه ۱۹/۶ درصد می باشد.

سنجش های ارزیابی کارایی مدل ها

ارزیابی عملکرد یک مدل آب شناسی نیاز به برآورد دقت رفتار شبیه سازی شده مدل در مقایسه با داده های مشاهداتی دارد. در این مطالعه از چهار تابع هدف برای سنجش عملکرد مدل HBV و مدل جفت شده ALSIS-HBV استفاده شده است. آماره های مورد استفاده شامل ضریب کارایی نش- ساتکلیف (NSE)، اریبی (BIAS)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، نسبت ریشه میانگین مربعات خطا به انحراف معیار داده های اندازه گیری (RSR) می باشد. ضریب نش- ساتکلیف (NSE) به صورت زیر تعریف می شود:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در آن N تعداد مشاهدات، Q_{obs} و Q_{sim} دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده، \bar{Q}_{obs} و \bar{Q}_{sim} متوسط دبی مشاهداتی و شبیه سازی شده برای کل دوره زمانی است.

BIAS نشان دهنده توافق کلی بین دو متغیر است. BIAS صفر به معنی عدم اریبی کلی در خروجی شبیه سازی شده در مقایسه با مشاهدات است. مقادیر اریبی مثبت و منفی به ترتیب نشان دهنده فرابرابر آورد و فروبرآورد مدل هستند.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim,i} - Q_{obs,i})}{\sum_{i=1}^N (Q_{obs,i})} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در مورد آماره RMSE مقادیر کمتر از نصف انحراف معیار قابل قبول هستند.

جدول ۳- آمار پایه بارش و رطوبت ALSIS، HBV و داده‌های مشاهداتی در زیرحوضه‌های کرخه (۲۰۱۰-۲۰۱۴)

زیرحوضه	میانگین (mm/day)	مجموع (mm)	کمینه (mm/day)	بیشینه (mm/day)	انحراف (mm/day)	استاندارد	ضریب تغییرات (%)
گاماسیاب	بارندگی	۱۰۷۵/۱۸	-	۴۹	۳/۰۴		۴۲۶/۵
	رطوبت خاک مشاهداتی	۰/۲۱	-	۰/۱۳	۰/۰۴		۱۹/۶
	رطوبت خاک ALSIS	۰/۲۱	-	۰/۱۶	۰/۰۳۶		۱۷/۳
	رطوبت خاک HBV	۰/۱۸	-	۰/۰۳۳	۰/۰۸		۴۶/۱
قره سو	بارندگی	۱۸۹۵/۳۱	-	۷۳	۴/۰۳		۳۸۸/۵
	رطوبت خاک مشاهداتی	۰/۲۷	-	۰/۱۳	۰/۰۷		۲۷/۴
	رطوبت خاک ALSIS	۰/۲۶	-	۰/۲۱	۰/۰۳		۱۳/۳
	رطوبت خاک HBV	۰/۱۸	-	۰/۰۳	۰/۰۹		۵۰/۹
کشکان	بارندگی	۱۹۲۰/۲۷	-	۷۰	۴/۲		۴۰۵/۰۵
	رطوبت خاک مشاهداتی	۰/۲۶	-	۰/۱۳	۰/۰۷		۲۷/۲
	رطوبت خاک ALSIS	۰/۲۷	-	۰/۲۲	۰/۰۴		۱۵/۹
	رطوبت خاک HBV	۰/۲۲	-	۰/۰۵	۰/۱۲		۵۳/۳
سیمره	بارندگی	۲۴۲۴/۱۱	-	۵۵	۴/۹۴		۳۷۲/۵
	رطوبت خاک مشاهداتی	۰/۲۱	-	۰/۱۳	۰/۰۴		۱۹/۶
	رطوبت خاک ALSIS	۰/۲۲	-	۰/۱۷	۰/۰۴		۱۸/۷
	رطوبت خاک HBV	۰/۲۶	-	۰/۱۱	۰/۰۸		۳۳/۸

است.

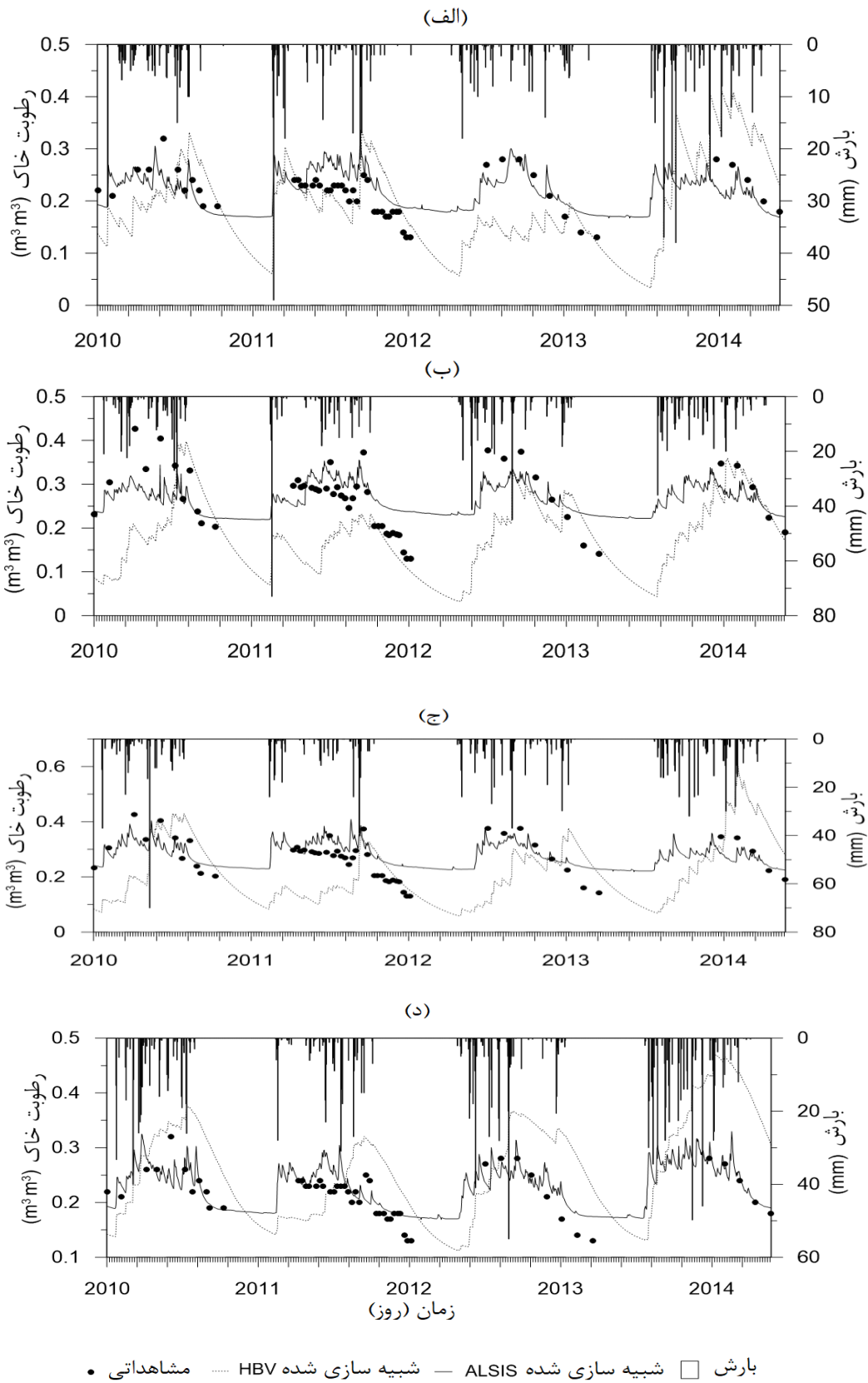
نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد خطای برآورد رطوبت خاک طرحواره ALSIS کمتر از مدل HBV است. در همه زیرحوضه‌ها مقادیر خطاهای RSR و RMSE مربوط به شبیه‌سازی رطوبت خاک طرحواره ALSIS از مدل HBV کمتر است. به‌جز زیرحوضه گاماسیاب در بقیه زیرحوضه‌ها مقدار آریبی رطوبت خاک طرحواره ALSIS از مدل HBV کمتر است. کمترین مقادیر خطای RSR و RMSE مربوط به شبیه‌سازی رطوبت خاک طرحواره ALSIS در زیرحوضه سیمره به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۰۲ میلی‌متر در روز است و کمترین مقدار خطای BIAS مربوط به شبیه‌سازی رطوبت خاک مدل HBV در زیرحوضه گاماسیاب، ۰/۰۲۵ است.

شکل (۲) مقایسه رطوبت خاک ALSIS و HBV با داده‌های

مشاهداتی را نشان می‌دهد. رطوبت خاک طرحواره ALSIS و مدل HBV در چهار زیرحوضه از تغییرات بارش تبعیت می‌کند. طرحواره ALSIS در فصول مرطوب و نقاط بیشینه رطوبت و مدل HBV در فصول خشک و نقاط کمینه رطوبت این تغییرات را بهتر نشان می‌دهند. بررسی نمودارها در هر چهار زیرحوضه نشان می‌دهد که تغییرات رطوبتی از فصل مرطوب به فصل خشک در مدل HBV نسبت به طرحواره ALSIS با شیب تندتری صورت می‌گیرد. طرحواره ALSIS این تغییر وضعیت را با شیبی ملایم نشان می‌دهد. مدل HBV در فصول مرطوب، رطوبت خاک را فقط در بارش‌های حدی به خوبی نشان می‌دهد و در سایر مواقع شبیه‌سازی رطوبت خاک توسط این مدل با خطا و دقت پایین همراه

جدول ۴- شاخص‌های آماریکرمدل‌های ALSIS و HBV در شبیه‌سازی رطوبت خاک

نام زیرحوضه/حوضه	مدل/طرحواره	BIAS	RMSE (mm/day)	RSR
گاماسیاب	HBV	۰/۰۲۵	۰/۰۶	۱/۵
	ALISIS	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۸۶
قره سو	HBV	۰/۲۶	۰/۱	۱/۵
	ALISIS	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۸
کشکان	HBV	۰/۱۳	۰/۱۱	۱/۷
	ALISIS	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۷۲
سیمره	HBV	۰/۷۴	۰/۱۶	۴/۰۵
	ALISIS	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۶۸



* فاصله زمانی بین تیک مارک‌های اصلی (Major Tick Marks) در نمودارهای افقی ۶۰ روز است.

شکل ۲- مقایسه رطوبت خاک ALSIS و HBV با داده‌های مشاهداتی در زیرحوضه‌های الف) گاماسیاب، ب) قره‌سو، ج) کشکان و د) سیمه

میزان RSR در زیرحوضه سیمره به ترتیب ۰/۲۸ و ۰/۲۸ می‌باشد. کمترین مقدار RMSE در حوضه کرخه و ۳/۷ میلی‌متر در ماه است و کمترین مقدار اریبی، ۰/۰۳ که مربوط به زیرحوضه کشکان است.

همان‌طور که در بخش نتایج رطوبت خاک اشاره شد طرحواره ALSIS رطوبت خاک نقاط بیشینه را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند. با جایگزین کردن رطوبت خاک این طرحواره در مدل HBV، بهبود نتایج شبیه‌سازی جریان رودخانه در مدل جفت‌شده کاملاً مشهود است. بنابراین، با این جفت‌سازی ضعف مدل HBV در شبیه‌سازی جریان‌های بیشینه تا حد زیادی برطرف می‌شود. شبیه‌سازی جریان‌های کمینه توسط مدل جفت‌شده به‌ویژه در زیرحوضه کشکان و کل حوضه کرخه با خطا همراه بود، هرچند که مدل جفت‌شده در زیرحوضه کشکان در برخی نقاط دبی کمینه نتایج بهتری نسبت به مدل HBV نشان داد و در سایر زیرحوضه‌ها و کل حوضه کرخه در بخش دبی‌های کمینه مانند مدل HBV عمل کرد. با این حال، نتایج جدول (۵) و مقایسه مقادیر توابع هدف مدل HBV با ALSIS-HBV، نشان می‌دهد با وجود خطای کمی که در شبیه‌سازی دبی‌های کمینه توسط مدل جفت‌شده وجود دارد باز هم نتایج مدل جفت‌شده بهتر از مدل HBV است و مقادیر خطای کمتر و ضریب نش-ساتکلیف بیشتری نسبت به مدل HBV نشان می‌دهد.

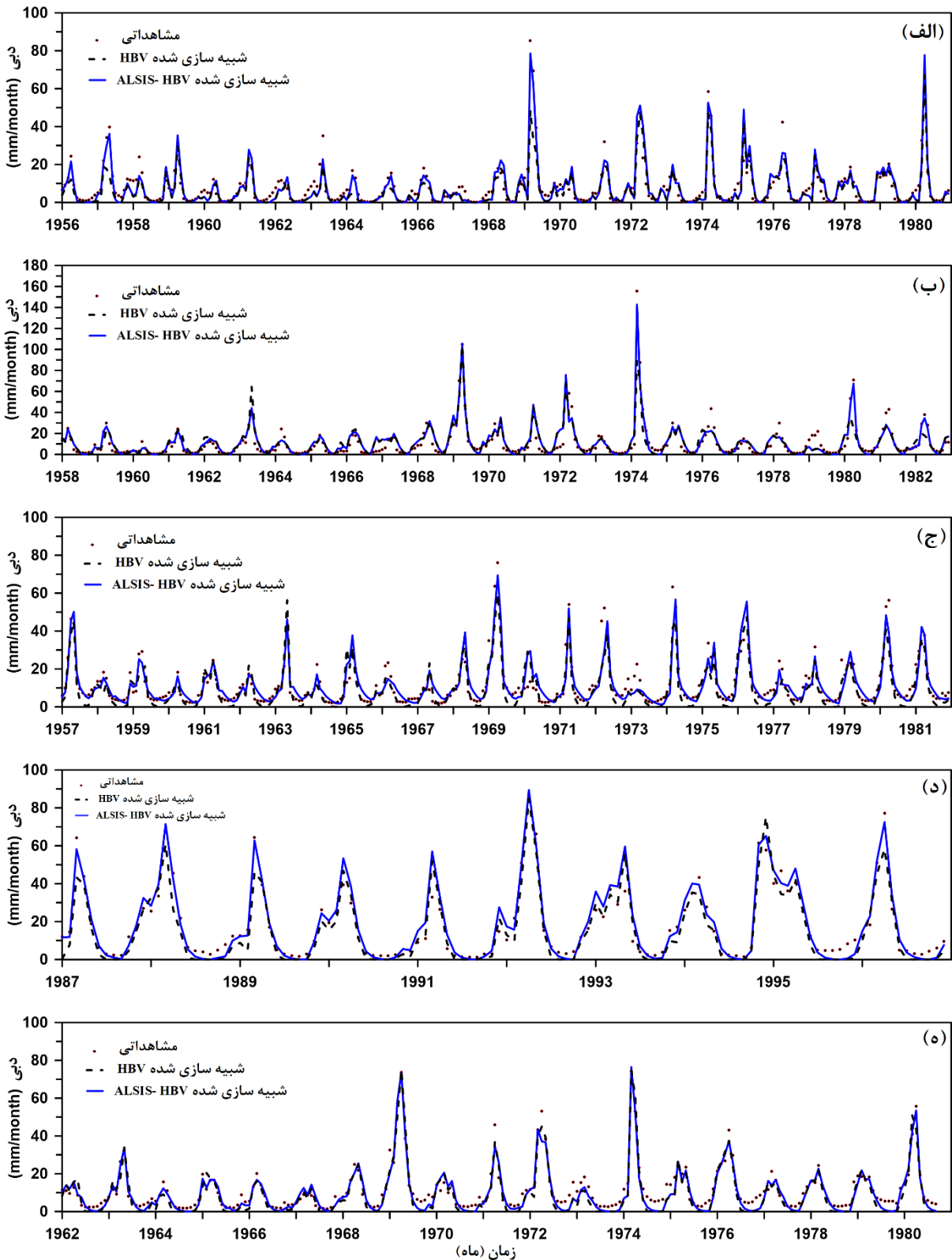
مقایسه نتایج اجرای مدل HBV و مدل جفت‌شده ALSIS-HBV شکل (۳) و جدول (۵) نتایج مقایسه جریان رودخانه شبیه‌سازی-شده HBV با ALSIS-HBV و ارزیابی نتایج آن‌ها از طریق مقایسه با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. مدل HBV دبی‌های سطحی، زیر سطحی و پایه را شبیه‌سازی می‌کند و در نهایت مجموع این سه دبی، رواناب خروجی نهایی حوضه را تشکیل می‌دهد. بنابراین، در این پژوهش رواناب خروجی نهایی حوضه به عنوان جریان رودخانه بررسی می‌شود.

مدل جفت‌شده باعث بهبود نتایج شبیه‌سازی جریان رودخانه و افزایش دقت شبیه‌سازی، به‌ویژه در جریان‌های بیشینه، می‌شود که در زیرحوضه‌های گاماسیاب و قره‌سو مشهودتر است. مقایسه مقادیر توابع هدف HBV با ALSIS-HBV نشان می‌دهد مدل جفت‌شده در همه زیرحوضه‌های کرخه و کل حوضه عملکرد بهتری نسبت به HBV داشته و منجر به افزایش ضریب NSE و کاهش خطا شده است. بهترین نتایج افزایش ضریب NSE مربوط به زیرحوضه قره‌سو است که از ۰/۷۶ به ۰/۸۸ رسید و کاهش خطا هم مربوط به همین زیرحوضه است که RMSE و RSR به ترتیب از ۷/۷ به ۴/۵ میلی‌متر در ماه و از ۰/۴۹ به ۰/۳۴ رسیدند. بهترین نتایج کاهش خطای BIAS مربوط به زیرحوضه کشکان است که از ۰/۲۴ به ۰/۰۳ رسید.

نتایج مدل جفت‌شده ALSIS-HBV در مقایسه با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد که بیشترین ضریب NSE و کمترین

جدول ۵- شاخص‌های آمار عملکرد مدل‌های HBV و ALSIS-HBV در شبیه‌سازی جریان رودخانه

نام زیرحوضه/حوضه	مدل	NSE	BIAS	RMSE (mm/month)	RSR
گاماسیاب	HBV	۰/۷۲	۰/۲۲	۵/۶	۰/۵۲
	ALISIS-HBV	۰/۸۲	۰/۰۶	۴/۵	۰/۴۲
قره‌سو	HBV	۰/۷۶	۰/۰۰۹	۷/۷	۰/۴۹
	ALISIS-HBV	۰/۸۸	۰/۰۳	۵/۴	۰/۳۴
کشکان	HBV	۰/۷۶	۰/۲۴	۵/۸	۰/۴۸
	ALISIS-HBV	۰/۸۱	۰/۰۳	۵/۲	۰/۴۳
	HBV	۰/۸۷	۰/۱۴	۶/۷	۰/۳۶
سیمره	ALISIS-HBV	۰/۹۲	۰/۰۴	۵/۴	۰/۲۸
	HBV	۰/۸۶	۰/۲۲	۴/۲	۰/۳۷
کرخه	ALISIS-HBV	۰/۹	۰/۱۴	۳/۷	۰/۳۱



شکل ۳- مقایسه سری زمانی ماهانه مقادیر شبیه‌سازی شده جریان رودخانه مدل HBV با مدل ALSIS-HBV در زیرحوضه‌های الف) گاماسیاب، ب) قره‌سو، ج) کیشکان، د) سیمره و ه) کل حوضه کرخه

بین رطوبت خاک مدل HBV و طرحواره ALSIS صورت گرفت و صحت نتایج رطوبت خاک هر دو مدل با داده‌های مشاهداتی بررسی شد. پس از اطمینان از نتایج بهتر شبیه‌سازی رطوبت خاک طرحواره ALSIS، جفت‌سازی این طرحواره با مدل

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به منظور بهبود شبیه‌سازی مدل آب‌شناسی HBV، تاثیر جفت‌سازی مدل HBV با طرحواره ALSIS در کل حوضه کرخه و زیرحوضه‌های آن بررسی شد. قبل از جفت‌سازی، مقایسه

در همه زیرحوضه‌های کرخه و کل حوضه عملکرد بهتری نسبت به HBV داشته و منجر به افزایش ضریب NSE و کاهش خطا شده است. بهترین نتایج افزایش ضریب NSE و کاهش خطا مربوط به زیرحوضه قره‌سو است. مطالعات مختلف Khodamorad Bouilloud and Coauthors, (Poor and Irannejad, 2009)؛ 2010 (Livneh et al., 2011)؛ 2014 (Min et al.) نشان داده‌اند جفت‌کردن طرحواره سطح زمین و مدل آب‌شناسی منجر به پیش‌بینی‌های بهتر فرآیندهای آب‌شناسی می‌شود.

در این پژوهش نسخه یکپارچه مدل HBV و طرحواره ALSIS به کار رفته است. یکی از مشکلات اساسی کاربرد نسخه یکپارچه این است که کل حوضه را به صورت یک نقطه در نظر می‌گیرد در صورتی که در نسخه توزیعی، حوضه شبکه‌بندی می‌شود و تاثیر متغیرهای هواشناسی به‌ویژه بارش بر شبیه‌سازی جریان رودخانه در نقاط بیشتری از حوضه در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین، دقت شبیه‌سازی در نسخه توزیعی نسبت به یکپارچه به مراتب بالاتر می‌رود. استفاده از نسخه توزیعی مدل HBV و طرحواره ALSIS و همچنین استفاده از داده‌های جهانی واداشت جوی شبکه‌بندی شده برای مطالعات بعدی پیشنهاد می‌شود.

HBV به منظور شبیه‌سازی بهتر جریان رودخانه توسط مدل جفت-شده ALSIS-HBV صورت گرفت.

مقایسه نتایج رطوبت خاک ALSIS و HBV با داده‌های مشاهداتی نشان داد در همه زیرحوضه‌ها همخوانی بهتری بین رطوبت خاک ALSIS و داده‌های مشاهداتی وجود دارد. میانگین رطوبت خاک و انحراف معیار ALSIS و داده‌های مشاهداتی تقریباً مشابه هستند. رطوبت خاک طرحواره ALSIS و مدل HBV در چهار زیرحوضه از روند بارش تبعیت کرده‌اند. طرحواره ALSIS در فصول مرطوب و نقاط بیشینه رطوبت و مدل HBV در فصول خشک و نقاط کمینه رطوبت این روند را بهتر نشان داده‌اند. بنابراین عملکرد بهتر طرحواره ALSIS در شبیه‌سازی رطوبت خاک منجر به جفت‌سازی طرحواره ALSIS با مدل HBV شد و رطوبت خاک ALSIS به عنوان ورودی برای مدل HBV تعیین شد. پس از جفت‌سازی، نتایج شبیه‌سازی جریان رودخانه توسط مدل HBV و مدل جفت‌شده ALSIS-HBV مقایسه و ارزیابی نتایج آن‌ها از طریق مقایسه با داده‌های مشاهداتی انجام شد. مدل جفت‌شده باعث بهبود نتایج شبیه‌سازی جریان رودخانه و افزایش دقت شبیه‌سازی، به‌ویژه در جریان‌های بیشینه، شد که در زیرحوضه‌های گاماسیاب و قره‌سو مشهودتر بود. مدل جفت‌شده

REFERENCES

- Abbott, M., Bathurst, J., Cunge, J., O'Connell, P. and Rasmussen, J. (1986). An introduction to the European Hydrological System—Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of hydrology*, 87(1), 61-77.
- Akhtar, M., Ahmad, N. and Booiij, M. (2008). The impact of climate change on the water resources of Hindukush–Karakorum–Himalaya region under different glacier coverage scenarios. *Journal of hydrology*, 355(1), 148-163.
- Bergstrom, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI, Report RHO 7, Norrköping, 134 pp.
- Bergstrom, S. (1995). The HBV model. In: Singh, V.P. (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications.
- Beven, K.J. and Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24(1), 43-69. DOI: 10.1080/02626667909491834.
- Bouilloud, L. and Coauthors. (2010). Coupling the ISBA land surface model and the TOPMODEL hydrological model for Mediterranean flash-flood forecasting: description, calibration, and validation. *Journal of Hydrometeorology*, 11(2), 315-333.
- Devia, G.K., Ganasri, B. and Dwarakish, G. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.
- Driessen, T.L.A., Hurkmans, R.T.W.L., Terink, W., Hazenberg, P., Torfs, P.J.J.F. and Uijlenhoet, R. (2010). The hydrological response of the Ourthe catchment to climate change as modelled by the HBV model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 651-665.
- Hansen, M., DeFries, R., Townshend, J.R. and Sohlberg, R. (1981). UMD global land cover classification, 8 kilometers, 1.0. Department of Geography, University of Maryland, College Park, Maryland, 1994: 1998.
- Hejabi, S. (2017). Development of a Water-Energy Balance Model in the Framework of the Palmer Drought Severity Index. Ph. D. dissertation, University of Tehran. (In Farsi)
- Herman, J., Reed, P. and Wagener, T. (2013). Time-varying sensitivity analysis clarifies the effects of watershed model formulation on model behavior. *Water Resources Research*, 49(3), 1400-1414.
- Hohenrainer, J. (2008). *Propagation of drought through the hydrological cycle in two different climatic regions*. Masterdissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany.
- Irannejad, P. and Shao, Y. (1998). Description and validation of the atmosphere–land–surface

- interaction scheme (ALSIS) with HAPEX and Cabauw data. *Global and Planetary Change*, 19(1), 87-114.
- Khodamorad Poor, M. and Irannejad, P. (2009). Simulation of discharge of the Karoon river by the OSU land-surface scheme in uncoupled and coupled form with the SIMTOP model. *Iranian Journal of Jerophysics*. 3 (2), 91- 107.(In Farsi)
- Leung, K.Y. (2006). An examination on the effectiveness of extended Kalman filter in land surface data assimilation. City University of Hong Kong.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of hydrology*, 201(1), 272-288.
- Livneh, B., Restrepo, P.J. and Lettenmaier, D.P. (2011). Development of a unified land model for prediction of surface hydrology and land-atmosphere interactions. *Journal of Hydrometeorology*, 12(6), 1299-1320.
- Min, L., Zhao-Hui, L., Chuan-Guo, Y. and Quan-Xi, S. (2014). Application of a coupled land surface-hydrological model to flood simulation in the Huaihe River Basin of China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7(6), 493-498.
- Munro, R.K., Lyons, W.F., Shao, Y., Wood, M.S., Hood, L.M., Leslie, L.M. (1998). Modelling land surface-atmosphere interactions over the Australian continent with an emphasis on the role of soil moisture. *Environmental modelling & software*, 13(3), 333-339.
- National Research Council, Committee on Hydrologic Science(2004). Groundwater fluxes across interfaces, National Academy Press, 85 pp.
- Parviz, L., Kholghi, M., Irannejad, P., Araghinejad, Sh. and Valizadeh, Kh. (2011). An Assessment of the Integrated Variable Infiltration Capacity and Routing Model in the Sefidroad River Basin. *Journal of Water and Soil*, 25 (3), 570-582. (In Farsi)
- Penman, H. (1961). Weather, Plant and Soil Factors in HYDROLOGY. *Weather*, 16(7), 207-219.
- Rakovec, O., Van Loon, A. F., Horacek, S., Kašparek, L., Van Lanen, H.A. J., Novicky, O. (2009). Drought analysis for the Upper Metuje and Upper Sazava catchments (Czech Republic) using the hydrological model HBV. WATCH Technical Report 19, accessed: 10-2013. URL: <http://www.eu-watch.org/publications/technical-reports>.
- Robinson, M. and Ward, R. (2000). Principles of Hydrology. Berkshire England: McGraw-Hill Publishing Company. Ward and Robinson.
- Rodell, M., Houser, P.R., Jambor, U., Gottschalk, J., Mitchell, K., Meng, C. J., Arsenault, K., Cosgrove, B., Radakovich, J., Bosilovich, M., Entin, J. K., Walker, J. P., Lohmann, D. and Toll, D. (2004). The Global Land Data Assimilation System, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381-394.
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8): 1015.
- Shafiei, M., Bazrafshan, J. and Irannejad, P. (2019). Comparison of four Sensitivity Analysis Methods of HBV Conceptual Model Parameters for Karkheh Basin and its Sub-basins. *Journal of Earth and Space Physics*, 45(1), 89-105.(In Farsi)
- Shen, H., Yuan, F., Ren, L., Ma, M., Kong, H., Tong, R. (2015). Regional drought assessment using a distributed hydrological model coupled with Standardized Runoff Index. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 368, 397-402.
- Shi, Y. (2012). Development of a land surface hydrologic modeling and data assimilation system for the study of subsurface-land surface interaction. Ph. D. dissertation, The Pennsylvania State University.
- SHMI, (2003). Homepage of the Original HBV-Model. URL:http://www.smhi.se/foretag/m/hbv_demo/html/welcome.html.
- Te Linde, A., Aerts, J., Hurkmans, R. and Eberle, M. (2008). Comparing model performance of two rainfall-runoff models in the Rhine basin using different atmospheric forcing data sets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3), 943-957.
- Tian, W., Li, X., Wang, X.S. and Hu, B. (2012). Coupling a groundwater model with a land surface model to improve water and energy cycle simulation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(1), 1163-1205.
- Van Loon, A.F. (2013). On the propagation of drought: how climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery. Ph. D.dissertation, Wageningen University.
- Van Loon, A.F., Van Lanen, H.A.J., Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Fendeková, M., Oosterwijk, J., Horvat, O. and Machlica, A. (2010). Understanding hydrological winter drought in Europe. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources*. edited by: Servat, E., Demuth, S., Dezetter, A., Daniell, T., Ferrari, E., Ijjaali, M., Jabrane, R., Van Lanen, H., and Huang Y., *IAHS Publication*, 340, 189-197.
- Van Pelt, S., Kabat, P., Ter Maat, H., Van den Hurk, B. and Weerts, A. (2009). Discharge simulations performed with a hydrological model using bias corrected regional climate model input. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(12), 2387-2397.
- Veenstra, D. (2009). *Exploring drought in the Upper-Guadiana Basin, Spain*. Master dissertation, Wageningen University.
- Wieder, W., Boehnert, J., Bonan, G. and Langseth, M. (2014). Regridded Harmonized World Soil Database v1. 2, Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Xu, P. and Shao, Y. (2002). A salt-transport model

within a land-surface scheme for studies of salinisation in irrigated areas. *Environmental Modelling & Software*, 17(1), 39-49.

- Yang, C., Shao, Y. and Lin, Z. (2015). Development of a two-way coupled land surface-hydrology model: Method and application. Proceedings of International Symposium on Climate Change and Water (ISCCCW). Nanjing, China, 309-317.
- Zhu, Z., Bi, J., Pan, Y., Ganguly, S., Anav, A., Xu, L.,

Samanta, A., Piao, S., Nemani, R.R. and Myneni, R.B. (2013). Global data sets of vegetation leaf area index (LAI) 3g and Fraction of Photosynthetically Active Radiation (FPAR) 3g derived from Global Inventory Modeling and Mapping Studies (GIMMS) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI3g) for the period 1981 to 2011. *Remote Sensing*, 5(2), 927-948.